

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт ЭНИН

Направление подготовки 13.04.01 – Теплоэнергетика и теплотехника

Кафедра Автоматизация теплоэнергетических процессов

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Тема работы
Система автоматизированного управления солнечной фотоэлектрической установкой с повышенной энергетической эффективностью
УДК 621.31:620.91

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ4Д	Гимазов Руслан Уралович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор каф. АТП	Шидловский Станислав Викторович	д.т.н., профессор		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. МЕН	Попова Светлана Николаевна	к.э.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. ЭБЖ	Антоневич Ольга Алексеевна	к.б.н., доцент		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор каф. АТП	Стрижак Павел Александрович	д.ф-м.н., доцент		

Томск – 2016 г.

## Запланированные результаты обучения по программе

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
	<b>Универсальные компетенции</b>	
P1	Использовать представления о методологических основах научного познания и творчества, анализировать, синтезировать и критически оценивать знания	Требования ФГОС (ОК- 8, 9; ПК-4), Критерий 5 АИОР (п.2.1), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P2	Активно владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в иноязычной среде, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты инновационной инженерной деятельности	Требования ФГОС (ОК-3; ПК-8, 24), Критерий 5 АИОР (п.2.2), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P3	Эффективно работать индивидуально, в качестве члена и руководителя группы, состоящей из специалистов различных направлений и квалификаций, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность следовать корпоративной культуре организации, осуществлять педагогическую деятельность в области профессиональной подготовки	Требования ФГОС (ОК-4, 5; ПК-3, 16, 17, 25, 27, 28, 32), Критерий 5 АИОР (пп.1.6, 2.3), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P4	Демонстрировать глубокие знания социальных, этических и культурных аспектов инновационной инженерной деятельности, компетентность в вопросах устойчивого развития.	Требования ФГОС (ОК-7), Критерий 5 АИОР (пп.2.4, 2.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P5	Самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-1, 2, 6), Критерий 5 АИОР (п.2.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
	<b>Профессиональные компетенции</b>	
P6	Использовать глубокие естественнонаучные, математические и инженерные знания для создания и применения инновационных технологий в теплоэнергетике	Требования ФГОС (ПК-1, 5), Критерии 5 АИОР (п.1.1), согласованные с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P7	Применять глубокие знания в области современных технологий теплоэнергетического производства для постановки и решения задач инженерного анализа, связанных с созданием и эксплуатацией теплотехнического и теплотехнологического оборудования и установок, с использованием системного анализа и моделирования объектов и процессов теплоэнергетики	Требования ФГОС (ПК-2, 7, 11, 18 – 20, 29, 31), Критерий 5 АИОР (пп.1.1, 1.2, 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI

P8	Разрабатывать и планировать к разработке технологические процессы, проектировать и использовать новое теплотехнологическое оборудование и теплотехнические установки, в том числе с применением компьютерных и информационных технологий	Требования ФГОС (ПК-9, 10, 12 – 15, 30), Критерий 5 АИОР (п. 1.3), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P9	Использовать современные достижения науки и передовой технологии в теоретических и экспериментальных научных исследованиях, интерпретировать и представлять их результаты, давать практические рекомендации по внедрению в производство	Требования ФГОС (ПК-6, 22 – 24, ), Критерий 5 АИОР (п. 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P10	Применять методы и средства автоматизированных систем управления производства, обеспечивать его высокую эффективность, соблюдать правила охраны здоровья и безопасности труда на теплоэнергетическом производстве, выполнять требования по защите окружающей среды	Требования ФГОС (ПК-21, 26), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P11	Готовность к педагогической деятельности в области профессиональной подготовки	Требования ФГОС (ПК-32), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Институт ЭНИН  
Направление подготовки – 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника  
Кафедра Автоматизация теплоэнергетических процессов

УТВЕРЖДАЮ:  
Зав. кафедрой

\_\_\_\_\_  
(Подпись)      (Дата)      (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Магистерской диссертации
--------------------------

Студенту:

Группа	ФИО
5БМ4Д	Гимазову Руслану Ураловичу

Тема работы:

Система автоматизированного управления солнечной фотоэлектрической установкой с повышенной энергетической эффективностью
Утверждена приказом директора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b>	Объектом разработки является система автоматизированного управления солнечной фотоэлектрической установкой с повышенной энергетической эффективностью. Комплектация разрабатываемой системы включает в себя фотоэлектрические модули, солнечный трекер, контроллер заряда с поддержкой экстремального регулирования мощности, аккумуляторную батарею и инвертор. Установка является частью автономной ветро-солнечной системы энергоснабжения загородного дома, с суточной нагрузкой постоянного тока 6 кВт·ч. Установка должна покрывать потребность в 3 кВт·ч/сутки, остальная часть нагрузки покрывается ветряком. Расчёт выработки электроэнергии установкой проводится по средним по России показателям количества пиковых солнечных часов, уровню солнечной инсоляции. При разработке системы следует использовать возможности имитационного моделирования.
---------------------------------	---

<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	<p>Целью работы является разработка системы автоматизированного управления солнечной фотоэлектрической установкой с повышенной энергетической эффективностью. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- рассмотрение и изучение существующих решений, выявление текущих проблем;</li> <li>- имитационное моделирование элементов разрабатываемой системы; оценка адекватности моделей; компоновка элементов в целостную модель системы;</li> <li>- оценка эффективности применения аппарата нечёткой логики в управлении системой;</li> <li>- расчёт системы, разработка программного обеспечения для расчёта требуемого элементного состава системы;</li> <li>- выбор оборудования для реализации системы;</li> <li>- рассмотрение нетиповых решений в автоматике установки, в виде схем на одноплатных контроллерах;</li> <li>- разработка схемной документации;</li> <li>- финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение;</li> <li>- социальная ответственность.</li> </ul>
<b>Перечень графического материала</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Схема функциональная солнечного трекера</li> <li>2) Схема электрическая солнечного трекера</li> <li>3) Схема электрическая зарядного устройства на одноплатном микроконтроллере</li> <li>4) Схема электрическая метеостанции на одноплатном микроконтроллере</li> </ol>
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Попова Светлана Николаевна, к.э.н., доцент каф. МЕН.
Социальная ответственность	Антоневич Ольга Алексеевна, к.б.н., доцент каф. ЭБЖ.
<b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b>	
Обзор литературы (Literature review)	

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор каф. АТП	Шидловский Станислав Викторович	д.т.н., профессор		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ4Д	Гимазов Руслан Уралович		

## Реферат

Магистерская диссертация включает в себя шесть основных разделов, введение и заключение, а также список использованных источников и пять обязательных приложений. Общий объём работы составляет 152 страницы. В представленном документе используется 41 иллюстрация, 23 таблицы и 90 источников. К работе прикладывается четыре листа графических материалов.

**Ключевые слова:** автономное энергоснабжение, альтернативная энергетика, фотоэлектрическая установка, энергоэффективность, солнечный трекер, экстремальное регулирование мощности, нечёткая логика, имитационное моделирование, одноплатные контроллеры.

Объектом разработки является часть автономной системы энергоснабжения частного дома, а именно фотоэлектрическая установка.

Целью работы является разработка системы автоматизированного управления фотоэлектрической установкой с повышенной энергетической эффективностью.

Разработка ведётся с использованием возможностей имитационного моделирования и известных методик расчёта фотоэлектрических систем.

В результате разработки получены модели фотоэлектрической системы, в частности уникальная модель фотоэлектрического модуля, создана уникальная программа для расчёта фотоэлектрических систем, доказана целесообразность применения нечёткой логики в алгоритмах регулирования. Разработанная система автоматизированного управления построена на основе одноплатных контроллеров, что снизило общую стоимость установки на 10 %. Разработанные модели элементов, а также созданная программа расчёта фотоэлектрических систем, могут быть использованы при проектировании аналогичных систем.

Разработанная система автоматизированного управления может применяться для различных фотоэлектрических систем, с целью повышения их энергетической эффективности.

## Определения

В данной работе применены следующие термины с соответствующими определениями:

- **автономная система энергоснабжения:** Совокупность источников и систем преобразования энергии, независимых от центральной сети энергоснабжения;
- **фотоэлектрическая установка (фотоэлектрическая система):** Установка для прямого преобразования солнечной энергии в электрическую энергию с помощью фотоэлектрических модулей;
- **солнечный трекер:** Система, предназначенная для слежения за перемещением солнца, чтобы получить максимальный КПД от солнечных батарей;
- **экстремальное регулирование мощности:** Режим отбора мощности в оптимальной рабочей точке вольт-амперной характеристики фотоэлектрического модуля;
- **имитационное моделирование:** Метод, позволяющий строить модели, описывающие процессы так, как они проходили бы в действительности;
- **нечёткая логика:** Раздел математики, являющийся обобщением классической логики и теории множеств, базирующийся на понятии нечёткого множества;
- **аппарат нечёткой логики:** Математический аппарат нечёткой логики;
- **энергоэффективность:** Эффективное (рациональное) использование энергетических ресурсов.

## Обозначения и сокращения

В данной работе применены следующие обозначения и сокращения:

СФЭУ – солнечная фотоэлектрическая установка;

ФМ – фотоэлектрический модуль;

MPPT – maximum power point tracking (отслеживание точки максимальной мощности);

ЭРМ – экстремальное регулирование мощности;

АБ – аккумуляторная батарея;

САУ – система автоматизированного управления;

ВАХ – вольт-амперная характеристика;

ВВХ – вольт-ваттная характеристика;

СБ – солнечная батарея;

ПО – программное обеспечение;

АРМ – автоматизированное рабочее место;

ШИМ – широтно-импульсная модуляция;

ВиН – возмущение и наблюдение;

СУ – система управления;

МПК – микропроцессорный контроллер;

ИМ – исполнительный механизм;

АСЭ – автономная система энергоснабжения.



Оглавление	
Введение	11
1 Обзор литературы	15
2 Объект и методы исследования	22
3 Расчёты и аналитика	25
3.1 Обзор существующих решений	25
3.2 Имитационное моделирование фотоэлектрической установки	34
3.3 Расчёт фотоэлектрической системы	57
3.4 Выбор элементов системы	65
3.5 Разработка системы автоматизированного управления фотоэлектрической установки	68
3.6 Компановка разработанной системы.	86
4 Результаты проведённой разработки	89
5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	93
5.1 Область применения системы	93
5.2 Расчет стоимости системы	93
5.3 Расчёт окупаемости системы	94
5.4 Выводы по разделу	96
6. Социальная ответственность	100
6.1 Производственная безопасность	101
6.2 Экологическая безопасность	108
6.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	109
6.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	110
Заключение	112
Список использованных источников	115
Приложение A Review of photovoltaic systems	124
Abstract	125
Introduction	125
1. Solar Technologies	127
2. PV tracking system	136

3. Maximum Power Point Tracking (MPPT)	138
4. Simulation modeling of PV systems	139
Conclusion	142
References	143
Приложение Б Листинг программы расчёта фотоэлектрической системы	145
Приложение В Заказная спецификация солнечного трекера	147
Приложение Г Листинг программы солнечного трекера	148
Приложение Д Заказная спецификация контроллера заряда	149

#### Графический материал:

ФЮРА.421000.001 С2 АСР положения солнечного модуля по солнцу. Схема функциональная.

ФЮРА.421000.001 Э3 АСР положения солнечного модуля по солнцу. Схема электрическая принципиальная.

ФЮРА.421000.001 Э3 Контроллер заряда с режимом ЭРМ. Схема электрическая принципиальная.

ФЮРА.421000.001 Э3 Метеостанция. Схема электрическая принципиальная.

## Введение

В условиях уменьшения запасов природного топлива, всё больше внимания уделяется использованию солнечной энергии в качестве основного энергоресурса. В настоящее время солнечные электростанции строятся не только в странах с высокой солнечной активностью, но практически во всех регионах мира с различными климатическими условиями. В связи с тем, что стоимость традиционных источников энергии сохраняет тенденцию роста, в настоящее время в регионах без стационарных сетей электропитания увеличивается уровень внедрения солнечных фотоэлектрических установок (СФЭУ). Это не только позволяет снизить экологическую нагрузку, но и экономически выгодно.

Солнечные фотоэлектрические установки осуществляют генерацию электроэнергии за счет прямого преобразования энергии солнечного излучения с помощью фотопреобразователей.

Современные СФЭУ обладают небольшим коэффициентом преобразования падающей солнечной энергии. В ясный солнечный день на каждый квадратный метр площади фотоэлектрический модулей (ФМ), перпендикулярной вектору солнечных лучей, поступает примерно 1 кВт энергии, но к потребителю поступает только часть этой энергии. Невысокие показатели реального КПД кремниевых фотоэлементов массового производства (в среднем 15 % [1]), а также недоиспользование возможностей фотоэлектрического модуля, являются факторами, негативно отражающимися на количестве генерируемой энергии. Как следствие – суммарная энергетическая эффективность обычной СФЭУ равна, примерно, 5–10 % [2].

В связи с невысокими показателями КПД СФЭУ, возникает вопрос о повышении их эффективности.

Повысить коэффициент энергетической эффективности СФЭУ не менее чем на 30–50 % возможно следующими основными способами:

- реализацией режима отбора мощности в оптимальной рабочей точке (MPPT-алгоритм) вольт-амперной характеристики в течение всего срока эксплуатации (режим экстремального регулирования мощности (ЭРМ) фотоэлектрических модулей);
- реализацией режима непрерывного автоматического слежения фотоэлектрических модулей за Солнцем (солнечный трекер);
- оптимизацией конструкции солнечной батареи с целью достижения минимального нагрева фотоэлементов.

Совершенствование фотоэлектрических установок прежде всего зависит от улучшения технических характеристик источников тока – фотоэлектрических модулей и аккумуляторных батарей (ФМ, АБ). Однако даже при самых совершенных источниках энергии энергетическая установка в целом может обладать неудовлетворительными энергетическими характеристиками из-за нерационального использования их возможностей. Поэтому при разработке СФЭУ должна решаться комплексная задача, объединяющая вопросы эффективности устройств и рационального подхода к их использованию. В связи с этим особую актуальность при разработке СФЭУ имеют имитационные модели, реализованные с помощью современных программных инструментов. Применение имитационного моделирования позволяет формировать системы с необходимой топологией, производить сравнительный анализ различных вариантов разрабатываемых структур, оптимизировать режимы функционирования и параметры моделируемого объекта, оценивать потенциал системы, с учётом различных особенностей, внешних условий, возмущений, прогнозировать работоспособность системы.

Вопросами повышения энергетической эффективности СФЭУ занимаются многие учёные, научные коллективы, институты и предприятия. Так, например, над вопросами оптимизации конструкции солнечных батарей ведут работу: коллектив учёных из технологического института Карслруэ [3]; компания солнечной энергетики Solimpeks [4];

коллектив учёных Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН [5]; и другие.

Немало внимания было уделено имитационному моделированию фотоэлектрических установок и их элементам: проекты учёных ИКИТ СФУ [6–8], работа коллектива учёных УГАТУ [9], разработки учёных университета им. Шри Рамасвами [10], и другие.

Несмотря на постоянное развитие солнечной энергетики, остаётся ряд проблем и вопросов, связанных как с эффективностью использования СФЭУ, так и с имитационным моделированием элементов солнечных установок.

Целью данной работы является разработка системы автоматизированного управления (САУ) солнечной фотоэлектрической установкой с повышенной энергетической эффективностью, включающей систему ориентирования по солнцу (солнечный трекер), систему эффективного использования мощности (MPPT контроллер), систему мониторинга внешних факторов влияния (метеостанция).

Для достижения поставленной цели решаются нижеприведённые задачи.

1. Рассмотрение и изучение существующих решений, выявление текущих проблем.
2. Имитационное моделирование элементов разрабатываемой системы; оценка адекватности моделей; компоновка элементов в целостную модель системы; оценка эффективности применения аппарата нечёткой логики в управлении системой.
3. Проведение исследований на основе созданной модели, определение требуемых характеристик элементов системы.
4. Разработка программного обеспечения для расчёта требуемого элементного состава фотоэлектрической установки.
5. Выбор оборудования для реализации системы.

6. Рассмотрение нетиповых решений в автоматике установки, в виде схем на одноплатных контроллерах.
7. Разработка схемной документации.
8. Оценка окупаемости системы.

Для решения поставленных задач используются такие инструменты, как: среда математического моделирования MATLAB/Simulink, среда разработки ПО Delphi, интегрированная среда разработки и компилятор онлайн ARMmbed. В данной работе применяются методы модельно-ориентированного математического исследования, имитационного моделирования, алгоритмизации, объектно-ориентированного программирования.

**Актуальность работы** связана с ростом отрасли альтернативного энергоснабжения и проблемами энергоснабжения отдалённых объектов, для которых проведение линий центрального энергоснабжения затруднительно или нерентабельно. Ещё одним актуальным вопросом, решаемым в данной работе, является оптимизация процесса проектирования фотоэлектрических систем, за счёт имитационного моделирования и специализированного программного обеспечения.

**Научная и практическая новизна работы** заключается в исследовании применения аппарата нечёткой логики для улучшения свойств алгоритмов, применяемых в контроллерах заряда фотоэлектрических систем; разработке элементной базы моделей фотоэлектрических систем, в частности уникальной модели фотоэлектрического модуля, учитывающей широкий спектр внешних воздействий; исследования энергоэффективных технологий применяемых в фотоэлектрических системах с помощью имитационного моделирования; разработке уникальной программы для расчёта фотоэлектрических систем; разработке систем автоматики для фотоэлектрических установок на базе одноплатных микропроцессорных контроллеров.

## 1 Обзор литературы

Вопросам разработки энергетически эффективных фотоэлектрических систем посвящено немало работ. Можно выделить труды таких научных коллективов и отдельных учёных, как: Ю.А. Шиняков, Ю.А. Шурыгин, В.В. Аржанов, А.В. Осипов, О.А. Теущаков, К.В. Аржанов, О.Е. Аркатова [11–13], А.В. Волгин, А.В. Юрченко, А.В. Козлов, М.В. Китаева, А.В. Скороходов, А.В. Охорзина [14, 15, 54], Ахмед Т.А. Джайлани, А.К. Сокольский [16], В.И. Иванчура, О.А. Донцов, Ю.В. Краснобаев [17, 36], М.М. Асанов, Э.А. Бекиров, С.Н. Воскресенская [18], Р. Benitez, J.C. Minano, P. Zamora [19], M.S. Sivagamasundari, P. Melba Mary, V.K. Velvizhi [20], и других.

Однако, несмотря на достаточное количество различных публикаций, потенциал энергетических систем на базе фотоэлектрических преобразователей остаётся до конца не раскрытым. В первую очередь это касается непосредственно самих фотоэлектрических модулей и фотоэлементов, из которых они состоят. Год от года эффективность фотоэлементов увеличивается за счёт новых технологий их изготовления и обработки [21–23].

Немало внимания уделяется такому немаловажному фактору, как теплоотвод от фотоэлементов, что также повышает энергетическую эффективность. Так, например, в работе [18] рассмотрено применение дополнительной поверхности для отвода тепла от фотоэлементов, а также приведена методика расчёта теплоотводящей поверхности, на основе расчёта площади абсорбера для солнечного коллектора. В [4] представлено использование гибридных фотоэлектрических модулей/коллекторов, которые позволяют вырабатывать электроэнергию, а также нагревать теплоноситель, за счёт отведения от фотоэлементов тепла, выступая, таким образом, ещё и в качестве солнечного коллектора.

Возможности фотоэлектрических преобразователей также значительно увеличиваются при реализации определённых

конструкционных особенностей. Так, например, в работе [5] приведены результаты реализации фотоэлектрических модулей на основе линзовых концентраторов и каскадных фотоэлектрических преобразователей; выводы по этой работе показывают двукратное увеличение КПД, в сравнении с обычными фотоэлектрическими модулями. В [26], для повышения эффективности фотоэлектрических преобразователей, предложено использовать акриловый концентратор, что значительно снизит объём необходимых фотоэлементов, с сохранением прежней выходной мощности.

Немаловажной технологией повышения энергетической эффективности солнечных фотоэлектрических установок является солнечный трекер – система наведения фотоэлектрических модулей на солнце. Согласно [12], из проведенного предварительного анализа энергетической эффективности систем автоматического слежения за Солнцем следует, что эффективность для Томска и Томской области относительно горизонтального расположения фотоэлектрических панелей составляет:

- при выставлении солнечной батареи под углом, равным широте местоположения, – 20 %;
- при применении одноосевой системы слежения за Солнцем – 42 %;
- при применении двухосевой системы слежения за Солнцем – 51 %.

Существует множество решений по реализации слежения и наведения фотоэлектрических модулей на солнце. Так, например, в [11] представлен двухосевой трекер на шаговых двигателях с датчиком положения, а в [24] модель инфракрасного солнечного трекера. Солнечные трекеры, использующие различные электродвигатели (шаговые двигатели, линейные двигатели, сервоприводы, ротаторы), как правило, включают в свой элементный состав контроллеры, вырабатывающие управляющее воздействие в зависимости от показаний следящей системы. Удешевить систему слежения за солнцем можно отказавшись от контроллерного управления, так в [26] приведена разработка солнечного трекера на



управляющей плате с коллекторным двигателем постоянного тока. Более простая конструкция солнечного трекера, была предложена Иден Фулл [25]; её трекер работает по принципу водяных часов. Выбор оптимальной системы слежения за солнцем должен осуществляться в зависимости от ряда условий, таких как: географическое положение, климатические условия, экономичность, доступное пространство, требуемые характеристики системы.

Ещё одним способом повышения энергетической эффективности автономных систем энергоснабжения является выбор оптимального алгоритма управления энергией. В последние годы всё большее распространение получают контроллеры заряда, поддерживающие алгоритмы поиска точки максимальной мощности (MPPT алгоритмы). Согласно [12], энергетическая эффективность реализации режима экстремального регулирования мощности может достигать 50%. Существует несколько методов поиска точки максимальной мощности. Так в [27] приведен метод токовой развёртки, использующий сигнал развёртки для тока фотоэлектрических модулей с целью обновления вольт-амперной характеристики (ВАХ) через фиксированные отрезки времени. Напряжение в точке максимальной мощности вычисляется по ВАХ с установленной периодичностью. В [28] рассматривается применение метода возрастающей проводимости. Суть метода заключается в считывании контроллером изменения тока и напряжения солнечной установки, с целью предварительной оценки эффекта от изменения напряжения. Метод возрастающей проводимости требует больших вычислений в контроллере. В [29] рассмотрен метод постоянного напряжения, также называемый методом напряжения холостого хода. При применении этого метода выходное напряжение регулируется постоянной величиной, не зависимо от условий. Этот метод применяется в дешёвых контроллерах и обладает большой погрешностью на дистанции, в виду того, что не учитывает изменения внешних условий. Наибольшее распространение получил метод

возмущения и наблюдения [8, 12, 30, 31]. В этом методе устройство MPPT на небольшую величину изменяет входное сопротивление, вследствие чего изменяется напряжение солнечной установки, и измеряет мощность, если мощность увеличивается – контроллер продолжает изменять напряжение в этом же направлении, пока мощность не перестанет увеличиваться. Недостатками этого метода является наличие колебаний мощности и сравнительно долгое время регулирования. Решением этих проблем видится применение аппарата нечёткой логики [34, 44]. Применение нечёткого MPPT контроллера рассмотрено в работах [35, 36]. Идея использования нечёткой логики в MPPT алгоритме возмущения-наблюдения состоит в задании нефиксированного шага изменения напряжения солнечной установки путём формирования на выходе нечёткого контроллера коэффициента усиления, увеличивающего шаг поиска до точки максимальной мощности, и уменьшающего его при нахождении этой точки.

При разработке систем альтернативного энергоснабжения, в частности СФЭУ, особую актуальность имеет имитационное моделирование, позволяющее на этапе проектирования формировать и исследовать системы с необходимой топологией, проводить оценку эффективности, сравнивать варианты построения системы. Так в [6-8] приведены примеры моделирования элементов автономных систем электропитания в среде MATLAB/Simulink. В [6] рассмотрены непосредственно основные элементы фотоэлектрической системы, приведены их модели и проведена проверка их адекватности. В [7] разработана модель системы электропитания, особое внимание уделено элементу действующей, динамически-меняющейся, нагрузки. В работе [2] приведены результаты исследования модели фотоэлемента, разработанной с помощью программного пакета COMSOL Multiphysics. Свою модель MPPT-контроллера заряда, на основе понижающего преобразователя напряжения, разработанную в среде Simulink, представил в [32] коллектив индийских учёных. Эта модель приближена к реальному MPPT контроллеру,

формирующему управляющие сигналы на понижающий преобразователь напряжения. В работе [35] рассмотрена модель MPPT контроллера на нечёткой логике, использующего две входные переменные: ошибку и шанс ошибки, в зависимости от которых, по заданному набору правил, формируется коэффициент усиления. Похожий контроллер с нечёткой логикой представлен в [36]; в отличие от [35], здесь нечёткий контроллер имеет только один вход – аналог производной мощности по напряжению, это несколько упрощает алгоритм и сокращает количество правил нечёткого контроллера.

Различные подходы к реализации модели фотоэлектрического модуля рассмотрены в [6, 9, 10, 30, 32]. Так, например, в [9] создана модель фотоэлектрического модуля с помощью средств Simulink учитывающая влияние уровня солнечной инсоляции (введены коэффициенты солнечной инсоляции) и температуры окружающей среды (введены температурные коэффициенты). В [30] приведена модель солнечной установки с использованием фотоэлектрического модуля, собранного из фотоэлементов стандартной библиотеки Simulink/Simscape. Стандартная модель фотоэлемента не учитывает многие внешние факторы, однако при этом не требует времени на создание и подходит для моделирования и оценки адекватности других элементов СФЭУ, например MPPT-контроллера. В работе [6] показано построение модели фотоэлектрического модуля из разработанных моделей фотоэлементов, с помощью средств библиотеки Simulink/SimPowerSystems. Несмотря на некоторые упрощения, модель фотоэлектрического модуля на базе элементов Simulink/SimPowerSystems может быть использована в моделировании силовых цепей автономных систем энергоснабжения, что показано в работах [7, 8].

При построении моделей элементов фотоэлектрических установок зачастую прибегают к упрощениям, пренебрегают некоторыми свойствами элементов. Так, например, большинство моделей фотоэлектрических модулей не учитывает угол падения солнечных лучей, ограничиваясь лишь

уровнем излучения. Также при моделировании пренебрегают деградацией элементов. Определённые сложности при моделировании фотоэлектрических модулей вызывают условия частичной затенённости (затенённость отдельных фотоэлементов) и обычно ими пренебрегают.

Ещё одним вопросом при разработке систем альтернативного энергоснабжения, и в частности СФЭУ, является непосредственно расчёт системы, определение требуемых параметров и подбор необходимых элементов. Методика расчёта фотоэлектрических систем рассмотрена в [37, 38]. Ручной расчёт фотоэлектрических систем будет достаточно трудоёмок, в случае, если требуется рассмотреть несколько комплектаций. В сети Internet можно найти таблицы для расчёта фотоэлектрических систем, выполненные в приложении MS Office Excel, несколько упрощающие разработку, однако их использование также не оптимально. Наиболее простым вариантом видится использование специального программного обеспечения, осуществляющего быстрый расчёт и требующего минимального времени на обслуживание. Проблемой является отсутствие в свободном доступе подобных программ. Существующие online калькуляторы фотоэлектрических систем ограничены по функционалу и могут не отвечать необходимым требованиям.

Подводя итог вышесказанному, можно выделить следующие выносимые на рассмотрение основные положения:

- при разработке СФЭУ должна решаться комплексная задача, объединяющая вопросы эффективности устройств и рационального подхода к их использованию;
- при разработке СФЭУ особую актуальность имеет имитационное моделирование, позволяющее на этапе проектирования формировать и исследовать системы с необходимой топологией, проводить оценку эффективности, сравнивать варианты построения системы;
- при построении моделей элементов фотоэлектрических установок зачастую прибегают к упрощениям, пренебрегают некоторыми свойствами

элементов. Для использования имитационного моделирования в разработке и оценке возможностей СФЭУ следует минимизировать упрощения и допущения, ввести поправочные коэффициенты;

- выбор оптимальной системы слежения за солнцем должен осуществляться в зависимости от ряда условий, таких как: географическое положение, климатические условия, экономичность, доступное пространство, требуемые характеристики системы;

- применение экстремального регулирования мощности (MPPT алгоритмы) значительно увеличивает энергетическую эффективность фотоэлектрических установок. Наиболее распространённый MPPT алгоритм – возмущение-наблюдение – приводит к колебаниям мощности и имеет сравнительно долгое время регулирования; применение аппарата нечёткой логики может избавить от этих недостатков;

- расчёт СФЭУ, определение требуемых параметров и подбор необходимых элементов лучше всего осуществлять с помощью специально разработанного программного обеспечения.

## 2 Объект и методы исследования

Объектом проектирования является система автоматизированного управления солнечной фотоэлектрической установкой с повышенной энергетической эффективностью. Минимальная комплектация разрабатываемой фотоэлектрической установки включает в себя фотоэлектрические модули, солнечный трекер, контроллер заряда с поддержкой экстремального регулирования мощности, аккумуляторную батарею и инвертор. Солнечная фотоэлектрическая установка является частью автономной ветро-солнечной системы энергоснабжения загородного дома с суточной нагрузкой постоянного тока 6 кВт·ч/сутки. СФЭУ должна покрывать потребность в 3 кВт·ч/сутки, остальная часть нагрузки покрывается ветряком. Режим работы автономной системы энергоснабжения зависит от природных факторов – наличия солнца и ветра, однако за счёт резервного электрогенератора и запаса аккумуляторных батарей, система может работать непрерывно. Расчёт выработки электроэнергии фотоэлектрической установкой проводится по средним по России показателям количества пиковых солнце-часов, уровню солнечной инсоляции. При разработке системы следует использовать возможности имитационного моделирования, позволяющие формировать и исследовать системы с необходимой топологией, проводить оценку эффективности, сравнивать варианты построения системы.

В рамках выполнения работы необходимо решить следующие задачи:

- разработать имитационную модель фотоэлектрической установки;
- на основе имитационного моделирования провести исследования и дать оценку внедрения энергетически эффективных технологий в комплекс фотоэлектрической установки;
- разработать программное обеспечение для расчёта фотоэлектрической системы на основе известных методик и произвести расчёт фотоэлектрической установки, согласно заданным требованиям к системе;

- осуществить выбор оборудования для разрабатываемой системы, по каталогам производителей;
- рассмотреть возможности применения одноплатных микроконтроллеров;
- составить схемную документацию разрабатываемой системы, включающую: структурные, электрические и функциональные схемы;
- произвести расчёт окупаемости системы;
- рассмотреть вопросы социальной ответственности;
- сделать выводы о проделанной работе, подвести итоги решения поставленных задач.

Для решения вышеуказанных задач применяются такие программные пакеты, как: MATLAB/Simulink, FLProg, Microsoft Visio, среда разработки Delphi, online среда разработки и компилятор ARMmbed.

Пакет прикладных программ MATLAB/Simulink является мощным инструментом моделирования, совмещающим широкие возможности с удобством и простотой работы. С помощью библиотек Simulink можно разрабатывать различные модели электросиловых, механических и гидравлических систем, а также применять развитый модельно-ориентированный подход при разработке систем управления, средств цифровой связи и устройств реального времени.

FLProg – инструмент, позволяющий создавать проекты для Arduino с помощью графических языков FBD и LAD, что значительно ускоряет процесс разработки прошивки для контроллеров Arduino.

Microsoft Visio — это мощное решение для создания диаграмм, включающее десятки наборов элементов и шаблонов, например, для решения инженерных задач, построения схем, управления, системного проектирования, планирования систем безопасности, разработки приложений, дизайна веб-сайтов и многого другого.

Среда разработки Delphi предназначена для быстрой разработки прикладного ПО для операционных систем Windows, Mac OS X, а также

IOS и Android. Благодаря уникальной совокупности простоты языка и генерации машинного кода, позволяет непосредственно, и, при желании, достаточно низкоуровнево взаимодействовать с операционной системой, а также с библиотеками, написанными на C/C++.

Среда разработки и компилятор ARMmbed позволяет создавать программное обеспечение для контроллеров mbed, а также проводить отладку созданной прошивки.

Согласно приведённой выше информации, пакет MATLAB/Simulink используется в данной работе для имитационного моделирования фотоэлектрической установки; среда разработки Delphi служит для написания программы расчёта фотоэлектрической системы; с помощью ARMmbed и FLProg осуществляется создание прошивки микроконтроллеров; Microsoft Visio применяется для создания требуемых схем.



## **5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

### **5.1 Область применения системы**

Разрабатываемая автоматизированная система управления (АСУ) солнечной фотоэлектрической установки (СФЭУ) рассчитана на использование в качестве части автономной системы энергоснабжения (АСЭ) загородного дома, не подключённого к сети. Задача СФЭУ в составе АСЭ обеспечить часть суточного потребления электроэнергии условным потребителем (загородный дом).

Потенциальными пользователями системы являются жители отдалённых районов, владельцы загородных домов, дач, развивающихся пригородов.

Наибольшую эффективность СФЭУ будет иметь в таких регионах России, как: Калмыкия, Ставропольский Край, Ростовская область, Краснодарский край, Волгоградская область, Астраханская область, Алтай, Приморье, Читинская область, Бурятия [58]. Однако, используя рассмотренные методы повышения энергетической эффективности СФЭУ, подобные системы можно использовать и в менее солнечных регионах.

Разработанная система полностью автономна и независима от внешних сетей. Выработка электроэнергии разделена 50/50 между СФЭУ и ветрогенератором, кроме того, в системе предусмотрен резервный бензиновый электрогенератор, что делает систему достаточно «неприхотливой». В зависимости от климатических условий и требований к количеству вырабатываемой электроэнергии, система может быть модернизирована различными способами.

### **5.2 Расчет стоимости системы**

Автономная система энергоснабжения состоит из солнечной фотоэлектрической установки, ветрогенератора и резервного бензинового электрогенератора.

В состав СФЭУ входят: фотоэлектрические модули, солнечный трекер, контроллер, аккумуляторная батарея, инвертор, соединительная арматура.

Стоимость компонентов системы приведена в таблице 5.2.1. Цены на оборудование взяты из каталогов продукции [62–71].

Таблица 5.2.1 – Стоимость компонентов АСЭ

Элемент системы			Цена за единицу товара, руб	Количество, шт	Итого, руб
СФЭУ	Фотоэлектрический модуль		16000	4	64000
	Солнечный трекер	Ротатор	6500	1	6500
		Датчик положения	50	1	50
		Конечные выключатели	1000	2	2000
		Элементы схемы	850	1	850
	Контроллер		3500	2	7000
	Аккумуляторная батарея		22000	2	44000
	Инвертор		23000	1	23000
	Соединительная арматура		2100	1	2100
Ветряк			25500	1	25500
Бензиновый электрогенератор			15000	1	15000
Всего, руб:			190000		

Выбор компонентов системы проведён согласно результатам расчётов элементов автономной системы энергоснабжения, приведенных в разделе «Расчёты и аналитика».

Стоимость системы можно уменьшить, если отказаться от солнечного трекера, что несколько уменьшит выработку фотоэлектричества. Так же можно использовать более дешёвые аккумуляторы для аккумуляторной батареи, что несколько снизит надёжность системы. Если в месте использования системы круглогодично дуют сильные ветра или высокий уровень солнечной инсоляции можно ограничиться одним источником альтернативной энергии. Также, в зависимости от требуемого количества вырабатываемой энергии, изменяется количество фотоэлектрических модулей.

### 5.3 Расчёт окупаемости системы

Для расчёта окупаемости автономной системы энергоснабжения, кроме стоимости самой системы, следует учитывать также затраты на подключение к сетям центрального энергоснабжения.

Так как рассматриваемая система применяется для снабжения загородного дома, отдаленного от существующих подстанций, стоимость подключения к центральным сетям может быть крайне существенной, так, например, для Московской области, это более 30000 рублей за каждый кВт установленной мощности [59]. Кроме того, стоимость прокладки низковольтной

линии электропередачи (ЛЭП) колеблется в разных регионах от 10000 до 17000 долларов США за 1 км [59]. Можно разделить стоимость подключения к энергосетям с соседями, или подключить к дому автономные системы энергоснабжения. Очевидными преимуществами подключения автономной системы являются: независимость от тарифов на электроэнергию, независимость от аварий на электросетях, возможность расширения системы.

Разработанная СФЭУ обеспечивает 3 кВт·ч/сутки энергии, при среднем количестве пиковых солнечных часов – 4 ч/сутки. В совокупности с ветряком мощностью 1 кВт, автономная система обеспечивает 6 кВт·ч/сутки.

Производство электроэнергии в год составит:

$$6 \cdot 365 = 2190 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Стоимость электроэнергии в Томской области, для сельских районов в 2016 году в среднем составляет 2,12 рубля за кВт·ч [61]. Тогда стоимость эквивалентной энергии от сети составит:

$$2190 \cdot 2,12 = 4642,8 \text{ руб. за кВт} \cdot \text{ч}.$$

Стоимость автономной системы энергоснабжения составляет 190000 рублей (таблица 5.2.1), следовательно, окупаемость системы без учета колебания тарифов на электроэнергию и без учёта стоимости подключения к центральной сети составит:

$$\frac{190000}{4642,8} \approx 41 \text{ год}.$$

Для подключения к центральной сети отдалённого поселения на 10 семей, потребуется, ориентировочно, 100000 рублей с одной семьи [60]. Если вычесть эту стоимость из цены АСЭ, окупаемость составит:

$$\frac{90000}{4642,8} \approx 19 \text{ лет}.$$

С учётом сохранения тенденции роста тарифов (экстраполируя стоимость тарифа по данным с 2012 по 2016 год [61] до 2029 года), расчёт окупаемости энергией приведён в таблице 5.3.1.

Из таблицы 5.3.1 следует, что с учётом роста тарифов на электроэнергию и вычетом стоимости подключения к центральным сетям, окупаемость системы составит около 13 лет.

Таблица 5.3.1 – Расчёт окупаемости, с учётом роста тарифов

Год	Тариф, руб. за кВт·ч	Стоимость энергии за год, руб. за кВт·ч
2016	2,12	4797,56
2017	2,27	5134,75
2018	2,41	5462,88
2019	2,56	5791,02
2020	2,70	6119,15
2021	2,85	6447,29
2022	2,99	6775,42
2023	3,14	7106,14
2024	3,29	7435,25
2025	3,43	7764,35
2026	3,58	8093,46
2027	3,72	8150,87
2028	3,87	8469,36
2029	4,01	8787,84
Итого:		94047,36

#### 5.4 Выводы по разделу

В ходе решения поставленных задач, была определена область применения системы и обозначены целевые регионы России, наиболее благоприятные для реализации разработки.

Основываясь на каталогах производителей, осуществлён расчёт стоимости автономной системы энергоснабжения, которая составила 190000 рублей.

Расчёт окупаемости автономной системы энергоснабжения показал, что в случае её установки в загородном доме, удалённом от центральных сетей, и с учётом роста тарифов на электроэнергию, система окупит себя менее чем через 13 лет. С учётом того, что гарантийный срок службы фотоэлектрических модулей составляет 30 лет, а ветряков – 25 лет, систему можно считать рентабельной. Без учёта роста тарифов, система окупается в течение 19 лет, что также является приемлемым показателем. Однако, если сети центрального электроснабжения находятся рядом с домом, и их функционирование не вызывает нареканий, выгоднее будет подключиться к ним.